4Б

УДК 004.93'1; 004.932; 528.85/.87(15)

Л.А. Белозерский, Н.И. Мурашко, Д.С. Сущеня
Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, г. Минск

Особенности полиномиальной геометрической коррекции применительно к задачам анализа изображений разновременной космической съемки

Рассматриваются вопросы влияния отличающегося количества реперных точек и точностей их топографической привязки на характеристики разновременных изображений. На основе моделирования полиномиальной геометрической коррекции с билинейной и бикубической интерполяцией яркостей исследуются особенности обнаруживаемых различий сопоставляемых изображений (фон) в условиях их фактического отсутствия.

Введение

Сопоставление изображений играет достаточно важную роль в многочисленных приложениях. К одному из наиболее распространенных способов решения этой задачи относится вычитание изображений, находящее применение в области сегментации, ориентированной на обнаружение изменений наблюдаемой сцены [1], [2]. Аналогичные операции лежат в основе анализа изменений наземных объектов, осуществляемого по разновременным изображениям космической съемки.

Отражая область определенных интересов, сопоставляемые изображения топографически (по координатам на местности) всегда совпадают друг с другом и порождаются некоторыми исходными изображениями, превышающими их по размерам, то есть выделяются из состава последних как фрагменты. Причем любая пара исходных изображений представляет собой результаты съемки земной поверхности в некоторой полосе охвата аппаратурой спутника, а каждое изображение из этой пары отличается как по времени осуществления сеансов, так и пространственно. Последнее отличие состоит в частичном перекрытии изображений пространства съемки.

Использованию исходных порождающих изображений предшествует их геометрическая коррекция, выполняемая в два этапа: непосредственно геометрическая трансформация и проводимое на ее основе переквантование яркостей. При этом к одному из способов осуществления первого этапа относится полиномиальное представление преобразований, а к наиболее распространенным способам переквантования – билинейная или бикубическая интерполяция.

Геометрическая коррекция, как и любая обработка изображения, должна приводить к потерям информации. К сожалению, в большом числе литературных источников эта особенность ее обычно не затрагивается или рассматривается поверхностно, без приведения каких-либо числовых характеристик. Так, в [3] отмечается только то, что билинейная интерполяция «далека от идеальной», хотя «часто применяется на практике, поскольку удовлетворяет одновременно требованиям приемлемой

точности и приемлемым затратам вычислительных ресурсов». Всего лишь предосторожность в использовании интерполяции высказывается в [4], так как «интерполяция сильно искажает изображение». При этом характеристик степени искажения не приводится. Наконец, в [5] подчеркивается, что в результате интерполяции яркостей старые значения яркостей не сохраняются, и даже рекомендуется повторную дискретизацию (переквантование) проводить уже после классификации.

Подготовительными действиями, предшествующими геометрической коррекции конкретного района съемки, может быть выбор и топографическая привязка реперных (опорных, контрольных) точек. После двух разновременных сеансов космической съемки паре соответствующих изображений может принадлежать неравное их число.

В соответствии с этим необходимыми оказываются знания того, как влияют ошибки топографической привязки реперных точек, их число и обработка изображений разновременной спутниковой съемки, выполняемой в процессе геометрической коррекции, на их характеристики.

Решение такого рода задачи по экспериментальным данным по физическим и экономическим причинам (ограниченное число дней спутниковой съемки в году, высокая стоимость снимков, погодно-климатическая изменчивость Земли и др.) не представляется возможным. Отсюда источником необходимых знаний в этом случае может быть моделирование.

1 Моделирование в задаче исследований геометрической коррекции

Модель в интересующих исследованиях должна реализовывать метод статистических испытаний, быть комбинированной, то есть включающей элементы реальной системы преобразования информации (программно реализованный алгоритм геометрической коррекции) и имитаторы входных воздействий. К ним относятся исходное (подлежащее геометрической коррекции) изображение какого-либо участка поверхности Земли и реперные точки.

Непротиворечивость такой модели может быть достигнута:

– выбором в качестве исходного изображения результата реальной спутниковой съемки;

– равномерной расстановкой (назначением) реперных точек (определение координат в пикселях) в пределах используемого исходного изображения;

– математически точным определением координат топографической привязки назначенных реперных точек (пересчет их) с любой заданной степенью искажения пространства при съемке, но соответствующей реально возможной;

– имитацией ошибок топографической привязки реперных точек, подчиняющихся нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, соответствующей реально достижимым разбросам, обеспечиваемым применением топографических карт или спутниковых навигационных средств.

Существо выполняемого моделирования состоит в варьировании числа реперных точек и точностей их привязки для получения пары геометрических коррекций одного и того же исходного изображения.

Завершающим этапом моделирования является обработка полученных пар изображений, одно из которых соответствует геометрической коррекции при преобладающем числе реперных точек, и для которых заранее известно, что никаких изменений участка земной поверхности они не несут.

Моделирование, выполненное при подготовке статьи, было основано на использовании программно реализованного алгоритма полиномиальной геометрической коррекции с переквантованием яркостей путем билинейной и бикубической интерполяций и следующих исходных данных:

– изображение космической съемки земной поверхности размером 2519 × 2134 пикселя с принятой разрешающей способностью 5 м (последний параметр может быть выбран произвольно, независимо от того, какое значение соответствует используемому изображению);

– координаты топографической привязки северо-западного угла изображения составляли:

$$x_{00} = 6065547,5 \text{ м}; \; y_{00} = 4520455 \text{ м}.$$

– 50 реперных точек ($n_{PT} = 50$), расставленных в пространстве избранного порождающего изображения[1], наборы топографических координат которых подготовлены для заданного его искажения в виде поворота на углы $\phi = 10^0, 15^0, 20^0, 30^0$;

– набор среднеквадратических ошибок точностей топографической привязки реперных точек $\sigma_{PT} = 0,5; 1,0; 5,0 \text{ м}$.

В качестве сопоставляемых изображений, используемых в оценках результатов геометрической коррекции, выбран фрагмент размером 1010 х 510 пикселей (площадь 515100 пикселей) с постоянными топографическими координатами привязки:

$$x_{\Phi} = 6060547 \text{ м}, \; y_{\Phi} = 4525455 \text{ м}.$$

При формировании пары изображений, скорректированных при разных условиях, каждое из них является порождающим для данного фрагмента, обеспечивая выделение его по координатам.

Процесс статистического моделирования в решаемой задаче имел смысл для оценки характеристик точности привязки результирующих изображений. Это требовало имитации выборок ошибок топографической привязки реперных точек. В то же время для сопоставления изображений фрагментов, получаемых при корректировке порождающего изображения с различным числом реперных точек, ошибки уже фиксировались, что соответствовало реальным условиям постоянства их значений после измерений и последующего использования при обработке данных.

2 Статистическая оценка точности топографической привязки трансформируемого изображения

Центральной задачей, решаемой в процессе первого этапа геометрической коррекции, является расчет топографических координат прямоугольной области размещения трансформированного изображения, ориентированной в направлении «Юг – Север». В результате определяются топографические координаты угловых положений области формирования геометрически трансформированного изображения (x_{00}, y_{00}; x_{10}, y_{10}; x_{11}, y_{11}; x_{01}, y_{01}), а через них – число его строк и столбцов.

Это, в свою очередь, обеспечивает возможность расчета координат каждого пикселя строки области геометрически трансформированного изображения. Последую-

[1] Учитывая, что это число при моделировании в интересах решения задачи можно изменять, будем для краткости последующего изложения называть коррекцию при пятидесяти реперных точках 50-точечной, при тридцати – 30-точечной и т.д. При этом фрагмент, полученный при большем числе реперных точек, может считаться эталонным по отношению ко второму.

щее обратное преобразование их значений в растровые координаты исходного изображения открывает возможность оценки топографического положения каждого пикселя трансформированного изображения относительно пикселей последнего. Этих данных достаточно для завершения процесса геокоррекции этих пикселей, осуществляемого на очередном ее этапе путем интерполяции к ним яркостей окружения, образуемого пикселями исходного изображения.

Прослеживая, таким образом, рассмотренный процесс от начала его реализации до конца с учетом предшествующей оценки точностей определения координат, легко предположить, что ошибки этапа пространственного преобразования геометрической коррекции изображений на последнем ее этапе должны вызывать:

– случайные от коррекции к коррекции смещения топографических положений сетки их пикселей за счет возникающих ошибок привязки северо-западного угла области геометрически скорректированного изображения (x_{00}, y_{00});

– связанные с предыдущей причиной изменения расстояний пикселей трансформируемого изображения относительно пикселей их окружения, используемого при интерполяции.

Полученные путем статистического моделирования геометрической коррекции среднеквадратические значения интересующих ошибок одной из координат x_{00}, при различном числе реперных точек и величинах ошибок их топографической привязки, приведены на рис. 1.

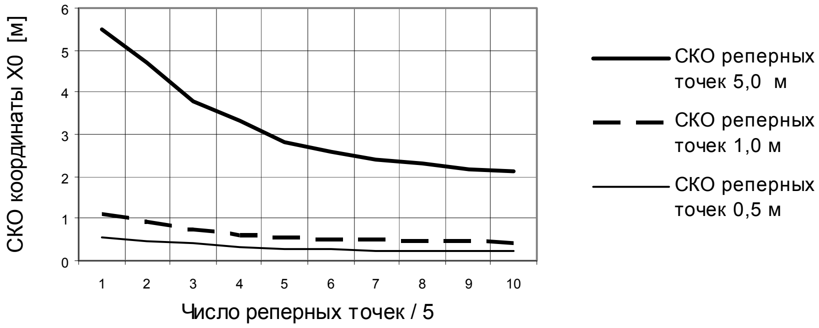


Рисунок 1 – Зависимости среднеквадратической ошибки (СКО) топографической привязки координат области геометрически скорректированного изображения

Интересно отметить, что в целом ряде методических предписаний для выполнения полиномиальной геометрической коррекции говорится о достаточности такого числа реперных точек, которое определяется порядком используемых полиномов, то есть равно числу их коэффициентов.

Таким образом, казалось бы, можно упростить задачу без каких-либо последствий. В то же время при этом открытым остается вопрос точности определения координат объектов на геометрически скорректированном изображении, немаловажность которого подтверждают приведенные зависимости на рис. 1.

Для того чтобы создать представления о том, к каким последствиям может приводить использование минимально допустимого числа реперных точек, можно воспользоваться рассмотренной методологией моделирования. Так, для полинома первого порядка и соответствующих ему трех реперных точек на рис. 2 приведена зависимость точности привязки преобразованного изображения $\sigma x_{00} = \sigma y_{00} = \varphi(\sigma_{PT})$. Причем, учитывая, что определение координат объектов на скорректированном изображении осуществляется относительно координат его северо-западного угла, приведенная зависимость характерна для ошибок оценки положений указанных объектов.



Рисунок 2 – Среднеквадратическая ошибка топографической привязки области геометрически скорректированного изображения как функция точности определения положений трех реперных точек

Отсюда нетрудно получить, что для максимально возможных ошибок определения положения реперных точек по топографической карте для таких наиболее распространенных масштабов как 1:250 000 и 1:500 000, максимальная ошибка привязки объектов на геометрически откорректированном изображении окажется равной $\pm 210\,\text{м}$ и $\pm 480\,\text{м}$ соответственно.

Следовательно, в зависимости от решаемой задачи, связанной с использованием геометрически скорректированных изображений, можно либо соглашаться с подобной точностью, либо в целях ее повышения предусматривать увеличение числа реперных точек по сравнению с минимально необходимым количеством и повышение точности их привязки (например, по данным навигационных спутниковых систем).

3 Характер влияния ошибок пространственной трансформации на яркостное преобразование изображения

Рассмотренные на рис. 1 точности топографического определения области геометрически скорректированного изображения, особенно при больших величинах СКО реперных точек, могут оказаться существенными в соответствующих смещениях положений сетки пикселей трансформированного изображения относительно ближайших к ним пикселей, принадлежащих исходному изображению. Выделение на таких порождающих изображениях в пределах заранее заданных и всегда постоянных топографических координат изображений фрагмента для разновременных сопоставлений должно сопровождаться изменением условий для интерполяции яркостей. Так, согласно данным рис. 1, например, при точности привязки реперных точек $\sigma_{PT} = 5\,\text{м}$ и их числе, равном 50, считая закон распределения ошибок нормальным, можно получить, что максимальные отличия координат привязки порождающего изображения лежат в пределах $\pm 6\,\text{м}$. При этом привязка изображения второго порождающего изображения, например, в случае проведения его геометрической трансформации с 15 реперными точками, характеризуется разбросом уже в диапазоне $\pm 10,5\,\text{м}$. Если же считать, что интересующими являются различия во взаимной

привязке изображений такой пары фрагментов, то соответствующий разброс может составить ±16 м. Причем, если это смещение превышает целое число пикселей, то порождаемый фрагмент при выделении его на изображении с такими ошибками привязки окажется случайно смещенным относительно его же, выделяемого на втором изображении. То есть условиями такого взаимного смещения по каждой из координат являются:

$$\Delta x_{\Phi} = \left[\frac{\Delta x_0}{\delta_x}\right] > 1; \quad \Delta y_{\Phi} = \left[\frac{\Delta y_0}{\delta_y}\right] > 1,$$

где $\Delta x_0 = x_{00}^{(1)} - x_{00}^{(2)}$; $\Delta y_0 = y_{00}^{(1)} - y_{00}^{(2)}$;

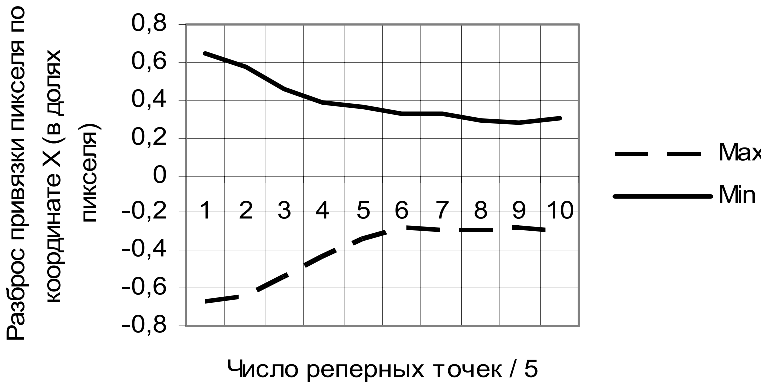
$x_{00}^{(1)}, x_{00}^{(2)}$ – координаты x_{00} привязки первого и второго порождающих изображений;

δ_x, δ_y – пространственное разрешение по координатам;

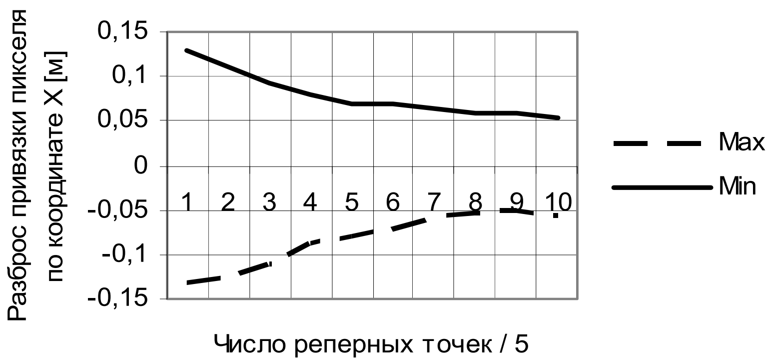
[…] – означает выполнение операции определения целой части частного.

Вторым источником неравных условий интерполяции изображений могут быть изменения положения пикселя, яркости которого определяются переквантованием исходного изображения. Эти изменения определяет дробная часть рассмотренной ошибки привязки геометрически скорректированных изображений.

На рис. 3 по данным статистического моделирования приведены диапазоны соответствующих разбросов по одной из внутрипиксельных координат.



а)



б)

Рисунок 3 – Диапазон разброса положений внутрипиксельной привязки координаты X пикселя, претендующего на переквантованную яркость; а) – для СКО реперной точки 5,0 м, б) – для СКО реперной точки 1,0 м

Если существенность ошибки смещения сетки изображений на целое число пикселей в результате выполненной коррекции можно считать очевидной, то внутрипиксельные смещения кажутся менее значимыми, чтобы прогнозировать их влияние на яркостную картину фрагментов. Поэтому они требуют отдельного изучения.

4 Оценка яркостных изменений переквантованных изображений

Оценка яркостных искажений при ошибках, не превышающих пиксельную разрешающую способность, оказывается возможной на введенной методологической основе как характеристика влияния координатных привязок пикселей-кандидатов. Причем искажения, вносимые непосредственно билинейной или бикубической интерполяцией, неотделимы от них, так как случайные отличия положений пикселей-кандидатов являются причиной изменений условий интерполяции яркостей.

Пониманию того, как рассмотренные смещения в привязке координат фрагмента (а значит, и его пикселей) влияют на его изображение при отличающемся числе реперных точек, используемых в геометрической коррекции, насколько они существенны или несущественны, в каждом конкретном случае помогает предлагаемое моделирование.

Сопутствующая моделированию обработка результатов, позволяющая ответить на поставленные вопросы, может включать следующие данные:

1. Изображения фрагмента, выделяемого из первого и второго порождающих изображений, полученные по одному исходному изображению в разных по числу реперных точек условиях координатного преобразования $L^{Ф}_{n_{PT1}}(x,y)$, $L^{Ф}_{n_{PT2}}(x,y)$.

2. Гистограммы изображений фрагментов $H\left[L^{Ф}_{n_{PT}}\right]$. (1)

3. Разностная гистограмма фрагментов $\Delta H\left[L\right]=H\left[L^{Ф}_{n_{PT1}}\right]-H\left[L^{Ф}_{n_{PT2}}\right]$. (2)

4. Разностное изображение положительных приращений яркостей:

$$\Delta L_1(x,y)=L^{Ф}_{n_{PT1}}(x,y)-L^{Ф}_{n_{PT2}}(x,y)=\begin{cases}\Delta L(x,y),\ \textit{если}\ \Delta L(x,y)>0;\\ 0\ \textit{в остальных случаях}.\end{cases} \quad (3)$$

5. Разностное изображение отрицательных приращений яркостей:

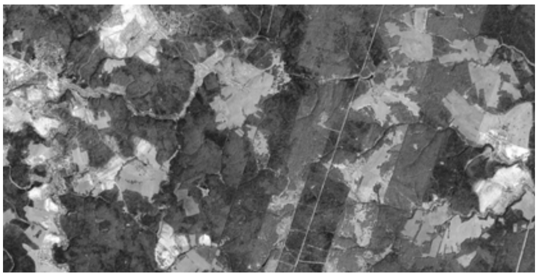
$$\Delta L_2(x,y)=L^{Ф}_{n_{PT2}}(x,y)-L^{Ф}_{n_{PT1}}(x,y)=\begin{cases}\Delta L(x,y),\ \textit{если}\ \Delta L(x,y)>0;\\ 0\ \textit{в остальных случаях}.\end{cases} \quad (4)$$

6. Гистограммы разности яркостей фрагментов $H\left[\Delta L_1\right]$ и $H\left[\Delta L_2\right]$. (5)

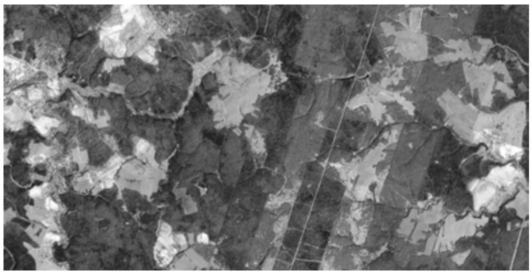
Если изображения фрагмента и их гистограммы (1) обеспечивают возможность зрительной оценки результатов геометрической коррекции, отличающейся числом реперных точек, то уже разностная гистограмма $\Delta H\left[L\right]$ (2) должна позволить количественно оценивать возникающие яркостные отличия. Наряду с этим разностные изображения (3) и (4) характеризуют пространственное распределение этих отличий, а их гистограммы (5) – яркостное распределение.

Применительно к двукратной геометрической коррекции одного и того же изображения при числе реперных точек, равного $n_{PT1}=15$, и $n_{PT2}=30$ для второго, и СКО

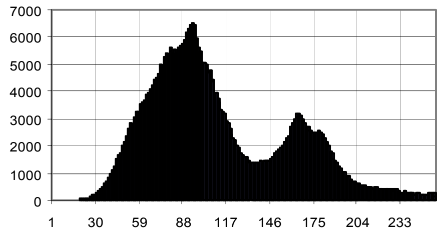
определения топографического положения этих реперных точек, равного $\sigma_{PT} = 5,0$ м, на рис. 4 приведен ряд характеристик из предусмотренного состава, полученных при обработке данных соответствующего моделирования.



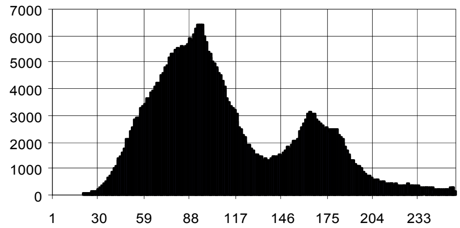
а)



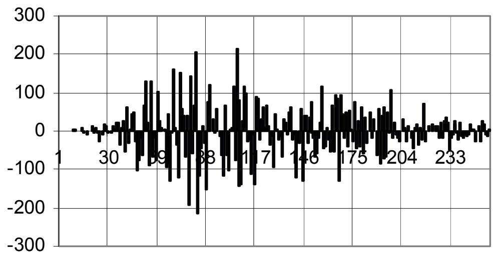
б)



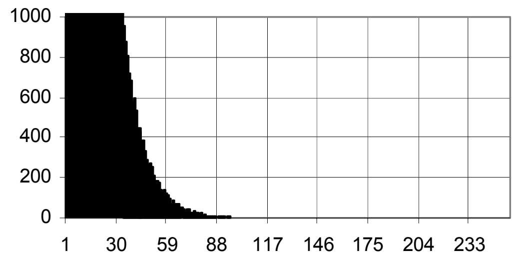
в)



г)



д)



е)

Рисунок 4 – Изображения фрагмента (а), б), полученные после геометрической коррекции порождающего изображения при отличающемся числе реперных точек (30 и 15), гистограммы их $H\left[L_{15}^{\phi}\right], H\left[L_{30}^{\phi}\right]$ (в), г), разность гистограмм $\Delta H\left[L\right]$ (д) и гистограмма их разности $H\left[\Delta L\right]$ (е)

Рассмотренные данные, как в части изображений фрагмента (рис. 4 а), 4б), так и их гистограмм (рис. 4 в), 4 г) не позволяют зрительно обнаружить отличий. Отсюда, принимая во внимание, что пара изображений фрагмента порождена одним и тем же исходным изображением, желательным (для исследователя, ориентирующегося на последующее применение разновременных изображений) являлось бы одно из следующих объяснений ситуации яркостного сравнения:

– изображения фрагмента полностью совпадают;

– изображения фрагмента достаточно близки.

В целях проверки истинности хотя бы одной из ситуаций необходимо обратить внимание, прежде всего, на проявление отличий изображений фрагмента, отображаемых данными разностной гистограммы $\Delta H\left[L(x,y)\right]$. Приведенная на рис. 4 д) такая гистограмма дает возможность установить наличие на одних яркостях приращение

числа пикселей компонент фрагмента 15-точечной коррекции (по сравнению с 30-точечной) наряду с равным ему (в силу постоянства площади компонент рассматриваемого фрагмента) сокращением их числа на других яркостях. Здесь сумма числа пикселей, приведших к изменению изображения фрагмента 15-точечной коррекции на соответствующих яркостях (положительных значений), равна 5362. То есть по сравнению с общей площадью изображения (515100 пикселей) эти изменения составили 1,04%.

Таким образом, причина зрительного сходства изображений фрагментов и их гистограмм очевидна и состоит:

– в сложности структуры изображений;

– в интегральном характере объединения большого числа пикселей на совпадающих яркостях в столбцах гистограмм, соответствующих большим площадям, при существенно меньших площадях изменений на тех же яркостях.

Если же рассмотреть дополнительно полученные данные по гистограммам разностных изображений (5) анализируемой пары фрагментов (на рис. 4 е) приведена одна из них в силу зрительного отсутствия отличий от нее второй), то можно обратить внимание, прежде всего, на следующие две особенности:

– сопоставляемые фрагменты не отличаются для 51,4 – 52,7% составляющих их пикселей (разности яркостей $\Delta L_1(x,y)$ и $\Delta L_1(x,y)$ равны нулю);

– для 47, 3 – 48,6% пикселей эти разности яркостей лежат в диапазоне 1 – 120 единиц, спадая почти экспоненциально примерно от 4% площади до нуля.

Однако приведенные числовые характеристики пикселей разностного изображения фрагментов вступают в противоречие с приведенными выше данными по площадям яркостных изменений (1,04%).

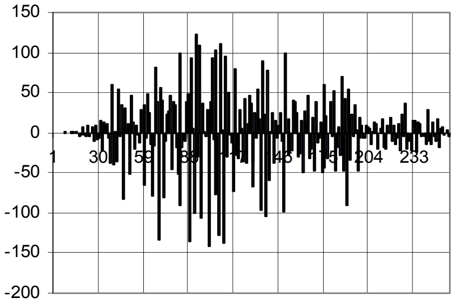
Отсюда следует пространственное несовпадение самих фрагментов, а это заставляет вновь обратить внимание на точность взаимной геометрической привязки фрагментов при 15 и 30 реперных точках. В рассматриваемом случае они составили: $\Delta x_{00} = -1{,}14\,м$ и $\Delta y_{00} = 1{,}15\,м$. При используемой пространственной разрешающей способности изображения, участвующего в моделировании (5 м), такие величины сдвига привязки должны считаться несущественными.

В то же время можно было обратить внимание, что на приведенном рис. 4 в составе результатов отсутствуют разностные изображения (3) и (4), интересные для анализа обнаруженного противоречия. Причиной этого явилось преобладание в их составе настолько малых яркостей, что представление их оказалось неинформативным, характеризуя ложное полное отсутствие различий в случае зрительного рассмотрения.

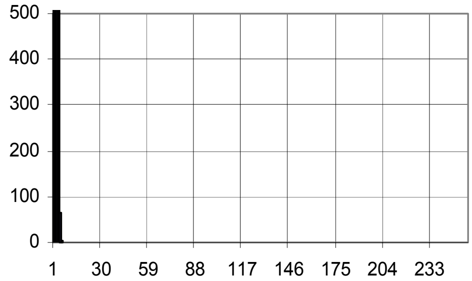
Для подтверждения обнаруженного расхождения между двумя источниками отличий фрагментов, а также для создания представлений о влиянии числа реперных точек, участвующих в коррекции пары разновременных изображений, на яркостные отличия фрагментов требуется проведение оценок при других сочетаниях n_{PT1} и n_{PT2}. В этих целях, сохраняя точность привязки реперных точек, используемую при моделировании в предшествующем случае ($\sigma_{PT} = 5{,}0$ м), можно сократить разрыв в их количестве. В частности, на рис. 5 приведены наиболее характерные результаты обработки получаемых данных для минимального различия: $n_{PT1} = 29$ и $n_{PT2} = 30$.

Изображения фрагментов и их гистограммы здесь не приводятся. Как и в предшествующем случае, они зрительно неотличимы и внешне выглядят совпадающими с ранее рассмотренными на рис. 4 а) – г). Несмотря на это, простое сопоставление приведенных на рис. 5 данных с аналогичными (рис 4 д), е), полученными при большом

разрыве в количестве реперных точек коррекции (15 и 30), обнаруживает уменьшение числа пикселей отличий фрагментов и сокращение диапазона яркостей разностного изображения.



а)



б)

Рисунок 5 – Разность гистограмм изображений фрагментов $\Delta H(L)$ (а) и гистограмма разности их яркостей $H(\Delta L_1)$ (б) при минимально отличающемся числе реперных точек (30 и 29)

Общая площадь возникающих здесь отличий, характеризуемых рис. 5, составляет уже 0,7% вместо 1,04% предшествующего эксперимента.

Гистограммы разностного изображения фрагментов (здесь на рис. 5 приведена гистограмма $H\left[\Delta L_1\right]$) демонстрируют уже 82% пикселей, совпадающих по яркостям при сравнении этих фрагментов. То есть 18% отличий пикселей лежат в диапазоне яркостей, сократившемся теперь до 1–5 единиц.

Не принимая во внимание другие аргументы, такие изменения можно было бы отнести к незначительным. Но, как и в предыдущем случае, обнаруживается противоречащая несопоставимость изменений фрагмента, порожденного при коррекции с 29 реперными точками относительно 30. Эти отличия по-прежнему выясняются отличиями данных тех же двух источников: разностной гистограммы и гистограммы разностного изображения фрагментов (0,7% и 18%).

Исключая возможную причину таких отличий в сдвиге изображений фрагмента, можно обнаружить, что здесь $\Delta x_{00} = -0,03\,\text{м}$ и $\Delta y_{00} = 0,47\,\text{м}$. Это существенно меньше пространственного размера пикселя изображения. В интересах поиска причины возникающих противоречий данные двух экспериментов по геометрической коррекции сведены в табл. 1

Таблица 1 – Сводные данные по яркостным отличиям фрагментов

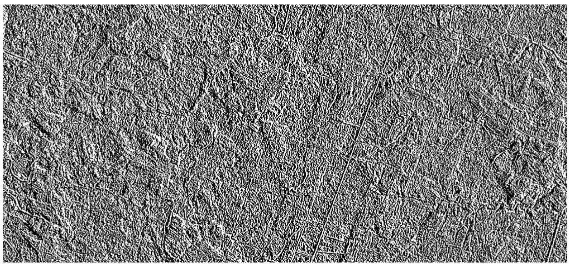
Число реперных точек сопоставляемых изображений фрагмента	Число пикселей, сохраняющих яркостную картину фрагмента	Среднее число пикселей совпадения яркостей разности изображений фрагмента	Диапазон яркостей изменений, обнаруживаемых по гистограммам разности фрагмента	Среднее число пикселей отличий яркостей разности изображений фрагмента
1	2	3	4	5
30 и 15	509738 (98,96%)	268026 (52,0%)	1 – 120	247074 (48,0%)
30 и 29	511391 (99,3%)	420824 (81,7%)	1 – 5	94276 (18,3%)

В результате сопоставления характеристик столбца 2 табл. 1 обнаружим, что и в одном и другом экспериментах почти полностью сохраняется яркостная картина изображений фрагментов $L^{Ф}_{15}(x, y)$ и $L^{Ф}_{29}(x, y)$ по сравнению с фрагментом $L^{Ф}_{30}(x, y)$. В то же время характеристики разностного изображения (столбцы 4, 5) в одном и в другом случаях вопреки такой близости яркостных представлений свидетельствуют о фактически имеющим место более низком качестве совпадения.

Одновременно, согласно табл. 1, второй эксперимент, несмотря на сохраняющееся противоречие, демонстрирует улучшение всех показателей. Такая тенденция продолжает иметь место при повышении точностей привязки реперных точек и последовательному увеличению их числа.

Убедившись в том, что отличие привязок геометрически корректируемого изображения не превышало в рассмотренных экспериментах размера одного пикселя, приходится само противоречие считать следствием пространственных различий фрагментов. *Пиксели, имеющие равные значения яркостей в одном и другом фрагменте и сохраняющие структуру этих двух изображений, при их вычитании оказываются взаимно не совпадающими друг с другом.* Наглядной характеристикой рассматриваемых пространственных отличий изображений фрагмента является бинаризация разностного изображения (рис. 6), выполняемая следующим образом:

$$\Delta B_i(x, y) = \begin{cases} 1 & \forall \Delta L_i(x, y) > 0; \\ 0 & \forall \Delta L_i(x, y) \le 0. \end{cases}$$



а)



б)

Рисунок 6 – Бинаризованная разность изображений фрагментов:
а) $\Delta L_1(x, y)$ для $n_{PT1} = 15$ и $n_{PT2} = 30$ и б) $\Delta L_1(x, y)$ при $n_{PT1} = 29$ и $n_{PT2} = 30$

Улучшение ситуации на приведенном рисунке можно увидеть по увеличению числа пикселей нулевой яркости в составе бинаризованных разностных изображений (возрастание черного фона, соответствующего нулевой яркости).

Выяснение причины появления рассматриваемых пространственных сдвигов совпадающих яркостей для разновременных изображений при разных условиях геометрической коррекции приводит к рассмотрению особенностей процесса прогнозирования внутрипиксельных координат положений последовательности пикселей-кандидатов, яркость которых должна быть установлена в результате этого процесса.

Оказалось, что в этом процессе роль играют как раз отличия координат выполненной привязки изображений, численно не превышающие пространственных размеров пикселей этих изображений. С другой стороны, его результаты зависят от степени искажения подлежащего коррекции изображения.

Процесс этот состоит в дискретно выполняемом прогнозе номера пикселя (строка, столбец) исходного изображения и дробной части его привязки (доли пикселя), характеризующих положение приобретающего яркость пикселя-кандидата откорректированного изображения. Номера пикселей-кандидатов каждой строки образуют траектории в пространстве исходного изображения-носителя яркостей для интерполяции.

В силу незначительных различий геометрической привязки одноименных строк траектории разновременных изображений в большей части информационного поля яркостей совпадают. Однако накопление сдвига за счет указанных различий одной траектории относительно другой в отдельных точках процесса приводит к смещению их на один пиксель, после чего совпадение прогнозируемых номеров продолжается. Это происходит неэквидистантно в ситуациях, когда углы привязки каждого из двух последовательно рассматриваемых пикселей-кандидатов совпадают с одним и тем же пикселем исходного изображения. В такие моменты одноименным пикселям строк изображений, полученным при разном числе реперных точек, соответствуют свои интерполяционные четверки для билинейной интерполяции или группы из 16 пикселей для бикубической интерполяции, взаимно смещенные на единицу. В пределах всего поля разностного изображения фрагментов такие смещения возникают нерегулярно и построчно неодновременно.

Наряду с этим периодически меняется внутрипиксельная привязка пикселей-кандидатов, изменяя условия интерполяции яркостей, что, в свою очередь, вносит ошибки в значения разности яркостей, свойственные этой операции.

В целом количество точечных взаимных отличий траекторий строк фрагментов (единичные скачки), полученных при возрастающем неравенстве числа реперных точек коррекции, нарастает. При этом растет и общее число пикселей, формирующих разности яркостей изображений фрагментов, ранее приведенные в столбце 5 табл. 1. Одновременно увеличивается диапазон яркостей разностных изображений фрагмента (рис. 4 е), 5 б) и столбец 4 табл. 1). Причем, как показывают результаты моделирования для рассматриваемых условий, указанное возрастание носит практически линейный характер от взаимного отличия координатных привязок фрагментов.

Выводы

Рассмотренный подход к оценке особенностей полиномиальной геометрической коррекции с билинейной или бикубической интерполяцией яркостей, ориентированный на решение задач анализа изображений разновременной космической съемки, и результаты проведенного моделирования при отличающихся численных составах реперных точек и точностях их топопривязки позволили установить, что:

1. Сопоставление двух одинаковых по размерам изображений фрагмента, топографически выделяемых по равенству их координат в пространстве одного и того же порождающего изображения, геометрически трансформированного при двух количественно отличающихся наборах реперных точек, обнаруживает несовпадение этих фрагментов по яркостям.

2. Причинами несовпадения яркостей изображений фрагментов являются:

– отличающиеся точности взаимной координатной топографической привязки изображений, порождающих их сопоставляемые фрагменты (отличие числа и точностей топопривязки реперных точек);

– замена яркостей исходного изображения интерполированными значениями при его геометрической коррекции.

3. Яркостные отличия изображений одного и того же фрагмента, полученного при разных условиях геометрической коррекции, представляют собой помеховый фон для решения задач их сопоставления способами, предполагающими образование разности разновременных изображений.

4. Причинами яркостных отличий сопоставляемых фрагментов являются:

– отличия положений фрагментов разновременных изображений в пространстве порождающих изображений за счет ошибок их привязки в процессе выполненной геометрической трансформации, составляющих целое число пикселей;

– локальные нерегулярные и несовпадающие по номерам пикселей в строках смещения на один пиксель, учащающиеся при росте взаимных ошибок привязки фрагментов, не превышающих размеры пикселя, и принимающие значения яркостей в зависимости от перепадов яркостей интерполируемого исходного изображения в пределах квадрата группировки пикселей интерполяции.

5. Образуемый помеховый фон характеризуют:

– незначительное количество пикселей (единицы процента от площади фрагмента), изменяющих яркости в составе фрагмента и, соответственно, его гистограмму (наиболее наглядно) при отличающемся числе реперных точек;

– незначительно отличающееся от 100% число пикселей сопоставляемых изображений фрагмента, обнаруживающих несовпадение по положению;

– сосредоточенность отличий сопоставляемых по положению яркостей смещенных изображений фрагмента в диапазоне, линейно расширяющемся при уменьшении числа используемых в геометрической коррекции реперных точек (от 0 единиц яркости до 140 единиц в условиях проведенного моделирования);

– снижение яркостного уровня при повышении точности определения координат реперных точек.

Литература

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс ; [пер. с англ. под ред. П.А. Чочиа]. – М. : ТЕХНОСФЕРА, 2006. – 1072 с.
2. Белозерский Л.А. Принципы селективно-яркостной сегментации изменений внешнего облика объекта моноспектральной космической съемки / Л.А. Белозерский, Л.В. Орешкина // Искусственный интеллект. – 2009. – № 4. – С. 395-408.
3. Цифровая обработка изображений в информационных системах : учебное. пособие / И.С. Грузман, В.С. Киричук [и др.]. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
4. Рис У. Основы дистанционного зондирования / У. Рис ; [пер.с англ.]. – М. : ТЕХНОСФЕРА, 2006. – 336 с.
5. Чандра А.М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А.М. Чандра, С.К. Гош. – М. : ТЕХНОСФЕРА, 2008. – 312 с.

L.A. Belozerskiy, N.I. Murashko, D.S. Suschenia

Features of Polynomial Geometric Correction Concerning to the Tasks of the Images Analysis Captured at Different Time Space Survey

The matters under consideration include the effects of different number of reference points and accuracy of their topographic location on the characteristics of images captured at different times. Relying on polynomial geometric correction modeling with bilinear and bicubic interpolation of brightness values, the specific features of apparent differences between the compared images (the background) were investigated under the conditions when there were no such differences really.

Статья поступила в редакцию 27.05.2010.